

doi: 10.19388/j.zgdzdc.2022.04.01

引用格式: 铁永波,孙强,徐勇,等. 南方山地丘陵区典型地质灾害成因机制与风险评价[J]. 中国地质调查,2022,9(4): 1-9. (Tie Y B,Sun Q,Xu Y,et al. Genetic mechanism and risk assessment of typical geological hazards in mountainous and hilly areas of South China[J]. Geological Survey of China,2022,9(4): 1-9.)

南方山地丘陵区典型地质灾害成因机制与风险评价

铁永波¹, 孙强², 徐勇³, 张勇⁴, 魏云杰⁵, 杨秀元⁶, 张泰丽², 谭建民³
(1. 中国地质调查局成都地质调查中心,四川 成都 610081; 2. 中国地质调查局南京地质调查中心,江苏 南京 210016; 3. 中国地质调查局武汉地质调查中心,湖北 武汉 430205; 4. 中国地质科学院探矿工艺研究所,四川 成都 611734; 5. 中国地质环境监测院,北京 100081; 6. 中国地质调查局水文地质环境地质调查中心,河北 保定 071051)

摘要: 南方山地丘陵区地域跨度大,地质灾害孕灾背景复杂、成灾模式多样,是我国地质灾害高易发区。针对南方山地丘陵区地质灾害潜在风险高的问题,在中国地质调查局“南方山地丘陵区地质灾害调查工程”实施进展基础上,对南方山地丘陵区地质灾害控灾的气候动力特征及地质构造背景进行了系统分析,对典型地质灾害成灾模式和多尺度风险调查评价示范性成果进行了总结,揭示了东南沿海地区典型台风地质灾害、南方岩溶塌陷、西南高寒山区冰碛土泥石流及川西高原区火后泥石流形成机理与物源侵蚀机制。在此基础上,开展了南方山地丘陵区基于县域、重点城镇及典型灾害点的多尺度地质灾害风险评价应用示范,相关成果在西南重大工程规划选线及县城搬迁选址中得到应用。

关键词: 南方山地丘陵区; 地质灾害成灾模式; 精细化调查; 风险评价; 应用示范

中图分类号: P642.2; X141 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-8706(2022)04-0001-09

0 引言

根据中国自然地理分界,我国南方地区为秦岭淮河以南区域。考虑地质灾害数据汇总的行政区划完整性需求特点,此次研究区包括南京、浙江、江苏、安徽、江西、湖南、湖北、广西、广东、贵州、四川、云南、重庆及上海共14个省(直辖市),面积约255万km²。研究表明,南方山地丘陵区共分布地质灾害16万余处,占全国地质灾害总数的1/2,频发的地质灾害给区域社会经济发展带来不利影响^[1]。据文献[2-5],南方山地丘陵区地质灾害调查与评价工作在新中国成立后就已开展,特别是在成昆铁路、三峡水电站等国家重大工程建设过程中,结合地方责任部门组织实施的1:10万地质灾

害区划、1:5万地质灾害详细调查等工作,基本查明了区域地质灾害发育规律与分布特征,在不同地区地质灾害早期识别、形成机理、监测预警及综合防治方面取得了显著进展,构建了系列多尺度地质灾害调查评价技术方法体系,对南方不同类型地质灾害的成因机制及成灾模式有了深入认识,对如今地质灾害“人防+技防”体系的构建起到了重要作用,带动了南方山地丘陵区地质灾害调查评价与综合防治进程。

随着南方山地丘陵区长江经济带、长江三角洲城市群、川藏铁路重大工程、三峡库区重大工程、粤港澳大湾区等国家重大战略的规划实施,对提升地质灾害调查评价精度提出了新的要求。为提升区域地质灾害调查评价精度,为区域国家重大战略防灾减灾提供决策依据,自然资源部部署了新一轮县

收稿日期: 2022-03-20; 修订日期: 2022-07-15。
基金项目: 中国地质调查局“南方山地丘陵区地质灾害调查工程(编号: 0502)”“川西山区城镇灾害地质调查(编号: DD20190640)”及国家自然科学基金“活动与气候变化对小流域凹槽土体发育规律的影响机制研究(编号: U20A20110-01)”等项目联合资助。
第一作者简介: 铁永波(1979—),男,博士研究生导师,中国地质调查局杰出地质人才、工程首席专家,主要从事地质灾害形成机理与风险评价研究。Email: tyb2009@qq.com。

域 1:5 万地质灾害风险普查和重点城镇 1:1 万地质灾害风险调查评价,旨在进一步查明南方山地丘陵区地质灾害风险底数。为提供新一轮地质灾害风险调查评价实施过程中的技术方法示范,中国地质调查局部署了由成都地质调查中心牵头实施、局属 6 家单位共同参与的“南方山地丘陵区地质灾害调查工程”。工程实施以来,聚焦南方山地丘陵区多尺度地质灾害风险调查评价、典型地质灾害成因机制研究与监测预警示范等内容开展工作,对南方山地丘陵区地质灾害的发育分布规律及主要成灾模式有了较为系统的把握,形成的相关技术方法在推进南方地区地质灾害高精度调查中发挥了积极示范作用,有力支撑了区域国家重大战略防灾减灾^[6-30]。

1 地质灾害孕灾背景

从全球尺度看,南方山地丘陵区总体位于现今华南陆块之上(图 1)。该陆块在早前寒武纪具有

多块体构造的复杂演化基础,自中、新元古代以来长期处于全球超大陆聚散与南北大陆离散拼合交接转换地带,有着复杂的构造动力学背景和地质构造演化历史^[17]。受不同地块结构特征及活动性影响,南方山地丘陵区地质灾害内动力控灾特征差异明显,以挤压隆升为主的喜马拉雅造山系和三江造山带地区深切河谷地貌发育,强变质与卸荷岩体结构为大型高位远程链式地质灾害的发育提供了有利条件;以总体稳定性较好的扬子板块多发育中山和丘陵地貌,南方碳酸盐、红层等特殊成因岩体为中、小规模地质灾害的发育奠定了重要基础;以弱活动强度为主的华夏造山系地区多发育丘陵地貌,表层强变质古老火山岩为小规模地质灾害发育提供了有利条件。同时,受区域性强风化因素影响,山区斜坡上发育有一定厚度的残坡积层土体,在降雨作用下极易沿其和基岩接触的基覆界面产生滑动,也是南方山地丘陵区汛期地质灾害多发、频发的控灾地质背景之一。

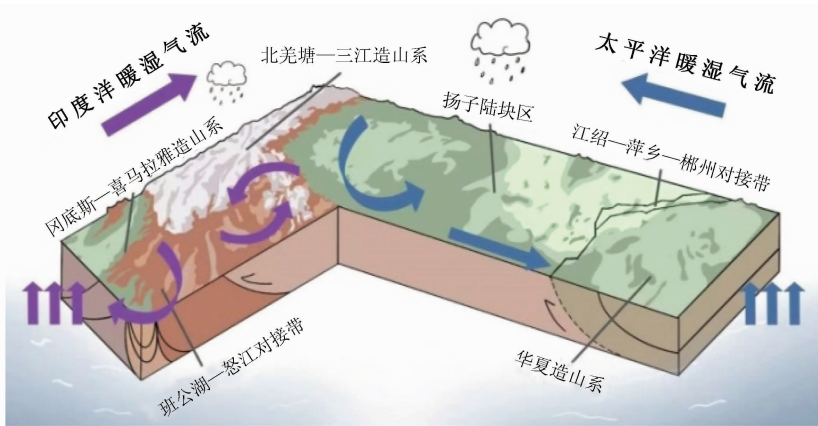


图 1 南方山地丘陵区地质灾害孕灾系统模式

Fig. 1 Pattern of geological hazard incubation system in mountainous and hilly areas of South China

据不完全统计,南方山地丘陵区约 90% 以上的地质灾害都发生在汛期(4—10 月)。诱发地质灾害的外动力条件极为复杂,对地质灾害的发生频次、规模等有明显影响,但总体上看,降雨是诱发区内地质灾害的最主要外动力条件^[30]。为深入分析降雨过程对南方地区地质灾害的影响特征,利用中国地面气候资料日值数据集(V3.0)(包含中国 824 个基准、基本气象站 1951 年 1 月—2017 年 12 月的逐日气象数据),对南方山地丘陵区总体降雨及汛期降雨的时空分布特征进行了分析,结果表明,南方山地丘陵区年均降雨量分布整体从西北 400 mm 往东南方向 2 000 mm 增加

(图 2(a)),表明不同纬度和经度上的降雨量值变化跨度较大,影响地质灾害形成的气候环境复杂。从 4—10 月年均暴雨降雨量空间分布规律看(图 2(b)),高值区位于广西壮族自治区南部局部靠海岸地区和广东省中南部沿海地区。其中:广西壮族自治区的钦州站汛期年均暴雨量为 902 mm;广东省川岛站汛期年均暴雨量为 1 133 mm、阳江站为 1 007 mm;江西、福建、湖北东部、浙江西南部、贵州、湖北、江西三省交界附近地区为 300 ~ 600 mm 左右。此外,还有四川盆地的西南部、东北部分地区以及贵州西北地区也为暴雨大值区,约为 400 ~ 500 mm,其中雅安站值最大为 539 mm。表明

南方山地丘陵区暴雨中心位置与地质灾害高密度地区的空间对应关系较好,特别是汛期暴雨降雨量集中区,如江西省东北部等地区都是汛期地质灾害

频发的区域,汛期暴雨降雨量的分布特征可为南方地区汛期地质灾害防御驻守指导重点地区的确定提供依据。

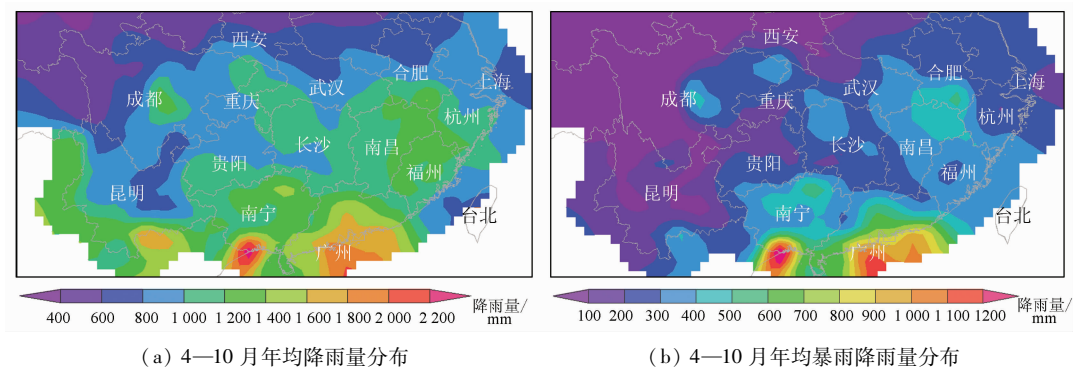


图 2 南方山地丘陵区 4—10 月降雨量分布
Fig.2 Rainfall distribution between April and October in mountainous and hilly areas of South China

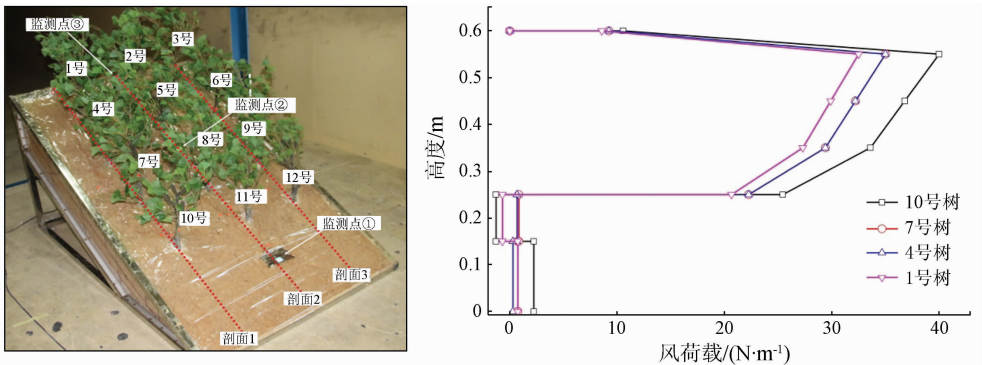
2 典型地质灾害成灾机制分析

在区域地质灾害发育特征与孕灾背景条件分析的基础上,开展了基于循环冻融实验的高寒山区地质灾害成因、基于风洞试验的台风地质灾害成因以及基于野外原位渗透实验的丘陵区人工边坡破坏等机理研究,深化了基于室内实验、野外现场实验及数值模拟等手段的地质灾害成因机理研究方法^[25,6-26]。

2.1 东南沿海地区台风暴雨滑坡成因机制

针对东南沿海台风过境时短时强降雨诱发的地质灾害成因机制复杂问题,考虑风力通过植被传导影响地表土体变形特征因素,通过模型风洞

试验、降雨模拟和原位监测等手段(图 3(a)),研究了台风暴雨过程中岩土体渗流机制及风力荷载对东南沿海丘陵地区浅表层土体破坏的影响(图 3(b)),揭示了台风摇曳产生的力会通过树干传到根部并被放大,导致岩土体裂缝的产生和扩张,使得土体松散且渗透性显著增大,从根本上改变了台风暴雨过程的渗流机制,为丘陵区滑坡的发生起到了积极作用。在此基础上创新提出了台风暴雨作用下表层土体裂隙优先流主导的渗流模式,揭示了台风、植被耦合体系对岩土体的“三促”(促裂、促渗、促滑)作用,并对各过程之间的相互关联作用特征有了深入认识,构建了台风诱发地质灾害的定量研究技术体系,成果对认识台风暴雨型地质灾害形成机理及风险管控提供科学依据。



(a) 台风地质灾害风洞试验模型 (b) 17m/s 风速工况下不同位置树木风力荷载差异特征

图 3 基于风洞试验的不同树高与风荷载的对应关系

Fig.3 Corresponding relationship between different tree heights and wind load based on wind tunnel test

2.2 南方岩溶区地面塌陷成因机制

研究表明,南方岩溶区地层不但在沉积过程中

产生了岩石的多孔介质(原生孔隙),而且在新构造运动过程中又形成了节理、断层等新的构造形

迹,从而为雨水向地表岩石的渗透溶蚀提供了基础条件。因地下溶蚀引起的地面塌陷是我国南方岩溶地区最为典型的地质灾害类型之一,如何查明地下岩溶地层的结构特征是揭示这类地质灾害成灾模式的最关键环节。针对岩溶塌陷区地质灾害形成的“隐蔽性”特点,在武陵山区采用瞬变电磁法(transient electromagnetic method,TEM)构建了地下岩溶空间三维模型,揭示了地下岩溶空间分布特征,显著提高了隐伏岩溶调查精度。研究表明,槽

谷底部或近底部往往分布有厚度不一的砂土层,在岩溶发育的槽谷地段,地下水集中向岩溶管道渗流,由于地下水位的下降,砂土层中产生动水压力,当动水压力大于砂土颗粒摩擦力与黏聚力时,砂土颗粒被渗流带动迁移,于土地底部形成土洞,当土洞规模不断增大,上部土层抗塌力小于其致塌力时,便发育土层塌陷(图4)。相关研究成果为区域岩溶塌陷地质灾害的成因机制解释及预测评价提供了定量依据。

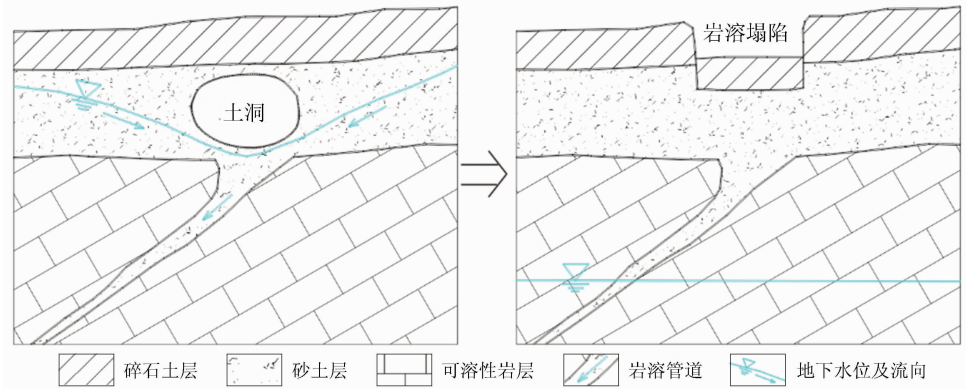
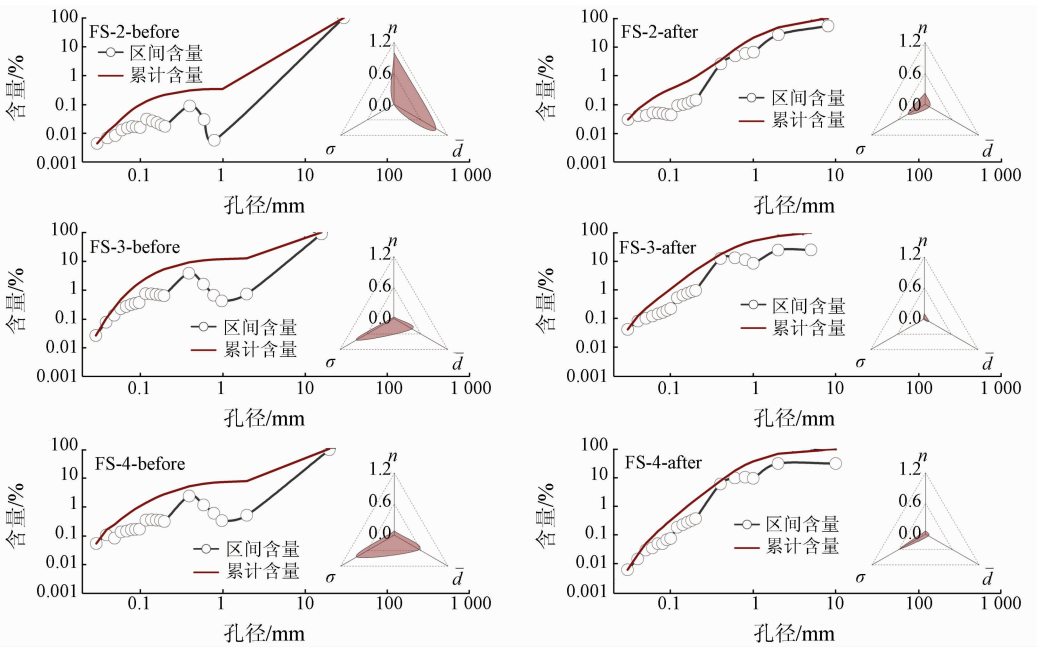


图4 南方典型岩溶地区三维结果模型及土洞塌陷破坏模式
Fig.4 3D model and collapse failure mode of soil cave in typical karst area in South China

2.3 西南高寒山区冰碛土泥石流成因机制
因冰川活动形成的冰碛土在高原循环冻融及暴雨等共同作用下启动形成的冰碛土泥石流是西

南高寒山区极为典型的地质灾害类型之一。为揭示高原冻融过程对冰碛土泥石流物源规模及频率的影响机制,如图5所示,通过室内物理模拟实验



FS-2. 循环冻融 20 次; FS-3. 循环冻融 30 次; FS-4. 循环冻融 40 次。

图5 非胶结性冰碛土(半饱水)孔隙体积含量分布
Fig.5 Distribution of pore volume content of non-cemented glacial till (semi saturated)

及 CT 扫描等手段开展了研究。结果表明,随着循环冻融次数的增多,冰碛土中水分不断发生相变,同时固体颗粒在冻胀力和渗透压力作用下,表面的裂隙不断扩大贯通,导致颗粒破碎,粒径变小,同时冰碛土的孔隙结构发生变化,使中、小孔隙不断扩展贯通形成大裂隙,从而使冰碛土中大孔隙数量不断增多,如原状冰碛土(半饱水)的孔径体积分布在多次冻融循环后均发生明显改变,由冻融前的倾斜“Z”字型变化为“S”型或者“类 S 型”,孔隙率 n 、平均孔径 $\bar{d}$ 均有减少趋势,标准差 σ 变化不明显^[12](图 5)。

2.4 川西高原区火后泥石流形成机理与物源侵蚀机制

针对近年来在西南气候干燥高原区频繁发生的火后泥石流成因机制开展了深入研究,揭示了山

火破坏地表植被后形成山火灰和烧焦土,在地表径流侵蚀下极易启动,进而成为泥石流启动物源的过程特征^[22]。在此基础上,针对山火地区火后泥石流物源侵蚀量估算多靠经验而缺乏定量评价的技术难题,开展了基于地表高精度三维建模并通过对比泥石流发生前后的沟道地表变化特征,提出了一种基于机载 LiDAR 三维建模的泥石流物源侵蚀量精准计算方法^[29],并在四川省凉山州火后泥石流地区开展应用研究,为该区火后泥石流的活动特征及趋势提供了重要依据(图 6(a))。在此基础上创新基于高精度地表模型的火后泥石流侵蚀物源量计算方法^[28],通过野外实测剖面及验证,该方法的精度误差低于 1%(图 6(b))。该研究为南方其他山火频发地区地质灾害研究提供了新的思路。

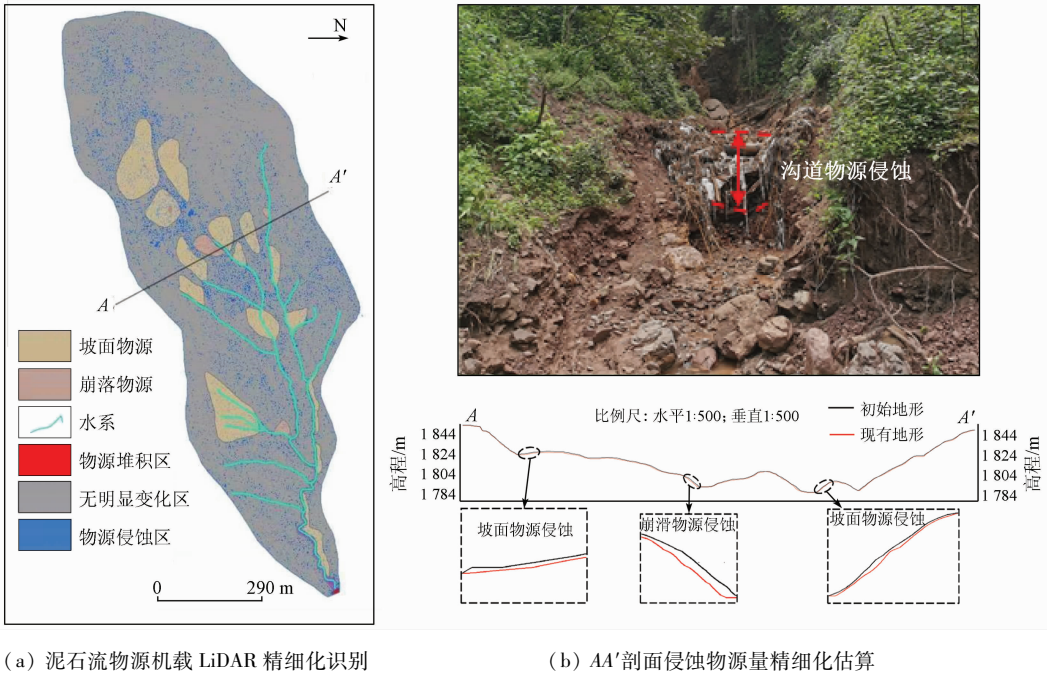


图 6 基于机载 LiDAR 技术的四川省凉山州火后泥石流物源精细化估算典型剖面
Fig.6 Typical profile of precise assessment of material source for post fire debris flow in Liangshan Prefecture of Sichuan Province based on airborne LiDAR technology

3 地质灾害风险调查评价与示范

3.1 县域尺度 1:5 万地质灾害风险调查评价应用示范

通过构建地形坡度、坡向、断层、工程地质岩组、水系等主控因子指标体系,形成了基于层次分析法和信息量法模型的地质灾害易发性评价方法,并在此基础上采用栅格法叠加区域多年月平均降

雨量(1:5 万县域),实现了基于不同降雨频率下的地质灾害危险性评价^[31],最终叠加最新三调数据后实现地质灾害风险评价与区划,实现了县域地质灾害风险定量评价^[32-34]。应用该方法体系在重庆市及四川、云南等省开展了典型县域尺度 1:5 万地质灾害风险调查评价示范,形成的四川喜德县示范成果作为样板在该州 13 个区县评价中应用,其成果作为地方国土空间规划编制的重要内容得到应用(图 7(a))^[34]。开展的云南省泸水市地质灾害

风险调查评价成果为泸水市旅游道路建设规划与 监测预警选区提供了地质依据(图 7(b))^[31]。

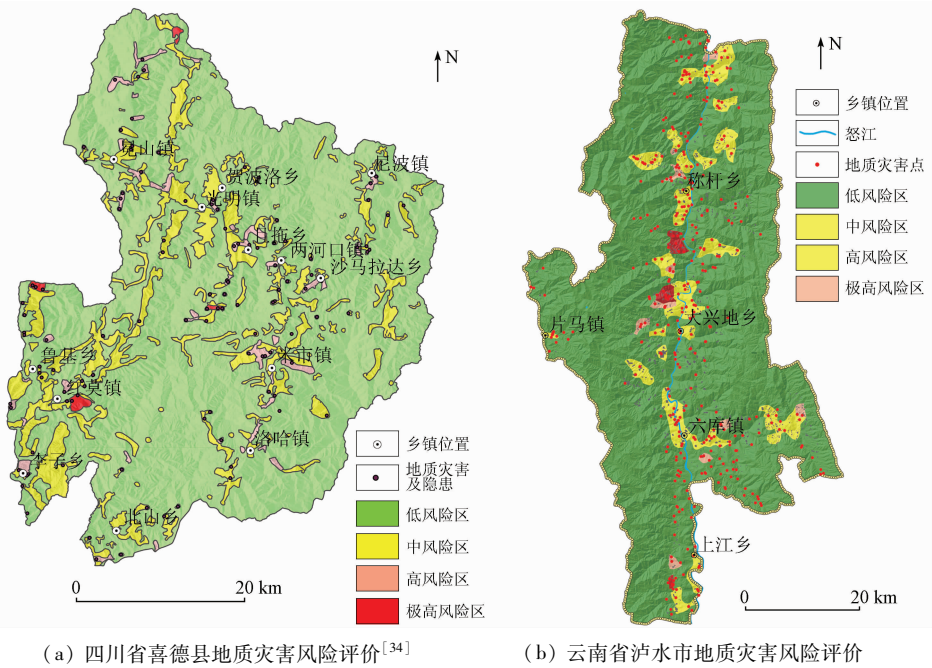


图 7 南方山地丘陵区典型县域尺度 1:5 万地质灾害风险评价成果

Fig. 7 1:50 000 geological hazard risk assessment results of typical counties in mountainous and hilly areas of South China

3.2 重点区 1:1 万地质灾害风险调查评价应用示范

针对南方山地丘陵区人口密集城镇和重要规划建设区面临的地质灾害风险评价技术方法推广难的问题,在工程中现有评价模型的基础上,通过结合不同地区地质灾害孕灾背景条件,优化土体结构参数、植被覆盖率、降雨曲线等评价指标,在斜坡单元划分基础上形成了多指标融合评价斜坡稳定性方法,显著提升了 20 a、50 a 甚至 100 a 一遇降雨条件下斜坡单元稳定性评价准确率问题。在此基

础上形成了以浙江省松阳县象溪镇、江西省兴国县江背镇、重庆市万州区大周镇、四川省喜德县冕山镇以及云南省德钦县叶芝镇等为典型代表的示范性成果,并在地方得到应用^[31-34]。如云南省德钦县叶芝镇风险评价成果划定的地质灾害风险区为该县新县城搬迁选址提供了重要依据(图 8(a));四川省喜德县冕山镇地质灾害风险评价示范性成果作为该镇地质灾害风险区监测示范点确定的重要依据(图 8(b))。

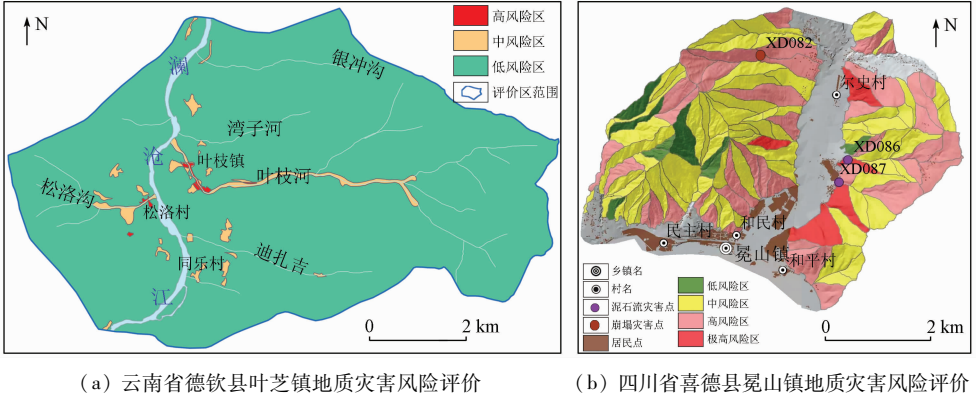


图 8 典型城镇 1:1 万尺度地质灾害风险调查评价成果

Fig. 8 1:10 000 geological hazard risk assessment of typical towns

3.3 重大单体地质灾害风险识别与应用示范

针对南方复杂山区地质灾害成因机制,深化

“空-天-地”一体化技术体系构建与应用,强化对地质本体认识分析的“地质过程机制分析+综合遥

感”复杂山区地质灾害精细化调查与风险识别思路,集成了基于区域地质灾害孕灾过程机制分析、高精度光学遥感解译、多时相 InSAR 监测、无人机倾斜摄影调查、机载 LiDAR 三维建模、工程地质勘察、地下物探、数值模拟等为一体的 1:2 000 尺度地质灾害精细化调查与风险识别技术。应用该方法在西南某重大铁路工程规划建设区成功识别 2 处对铁路特大桥和重要隧道有潜在地质安全风险的地质灾害隐患点。通过多方反复论证后,提出桥梁设计结构方案优化与隧道进口平移的建议被工程设计单位全部采纳,并依此对工程进行了设计变更,有效为约 4 亿元的工程设施安全保障提供了科学依据^[26]。

4 结论与展望

(1)总结了台风型滑坡、岩溶型塌陷、暴雨型泥石流等不同外动力诱发的典型地质灾害特征,揭示了区域性地质灾害孕灾背景与动力条件差异组合形成的不同类型地质灾害成因机制,为南方山地丘陵区地质灾害机理研究与风险评价奠定了基础。

(2)南方山地丘陵区不同尺度地质灾害风险评价技术方法体系已基本建立,但由于孕灾背景条件差异性极大,对相关指标的不合理分析容易得出有偏差的结果,因此,在评价指标的选取时需要在系统分析地质灾害主控因素的基础上有针对性选择主要指标进行评价。

(3)南方山地丘陵区植被类型及其覆盖度差异性大,若构建统一的区域性地质灾害隐患识别指标体系难度极大,需要划分出高山峡谷区、丘陵区等基于地貌单元的分区,同时还要考虑基于不同植被覆盖度和基于地质灾害孕灾背景条件的差异分区,使识别指标的选取更具科学性。

(4)随着系列国家重大战略实施安全和区域地质灾害防灾减灾需求,南方山地丘陵区地质灾害调查评价精细化、监测预警智能化、风险管控网格化、信息更新动态化是未来的必然发展趋势。

致谢: 本文撰写过程中四川省气象局曾波高级工程师参与了相关图件制作和文字说明,成都地质调查中心申华梁高级工程师、徐伟高级工程师、龚凌枫工程师及博士研究生卢佳燕、鲁拓及硕士研

究生李光辉、李果、杨昶等参与了文中部分制图及文字编写工作。此外,参与本工程所属二级项目的其他技术人员也对论文的撰写做出了贡献,在此一并表示感谢!

参考文献(References):

- [1] 崔鹏. 中国山地灾害研究进展与未来应关注的科学问题[J]. 地理科学进展,2014,33(2):145-152.
Cui P. Progress and prospects in research on mountain hazards in China[J]. Prog Geogr,2014,33(2):145-152.
- [2] 殷跃平. 三峡库区重大地质灾害及防治研究进展[J]. 岩土工程界,2004,7(8):20-26.
Yin Y P. Progress on major geological hazards and their mitigation in the Three Gorges Reservoir Area[J]. Geotech Eng World, 2004,7(8):20-26.
- [3] 谢洪. 成昆铁路北段泥石流及其综合防治原理[J]. 地球科学进展,1992,7(5):83-84.
Xie H. Debris flow in north section of Chengdu-Kunming Railway and its comprehensive prevention principle[J]. Adv Earth Sci,1992,7(5):83-84.
- [4] 唐邦兴. 中国泥石流[M]. 北京:商务印书馆,2000.
Tang B X. Debris flows in China[M]. Beijing: The Commercial Press,2000.
- [5] 刘传正. 我国地质灾害防治取得卓越成就[J]. 中国减灾,2019(19):20-23.
Liu C Z. Remarkable achievements have been made in the prevention and control of geological hazards in China[J]. Dis Reduct China,2019(19):20-23.
- [6] 铁永波,徐勇,张勇,等. 南方山地丘陵区地质灾害调查工程主要进展与成果[J]. 中国地质调查,2020,7(2):1-12.
Tie Y B,Xu Y,Zhang Y,et al. Main progresses and achievements of geological hazards survey in hilly area of southern China[J]. Geol Surv China,2020,7(2):1-12.
- [7] Bai Y J,Wang Y S,Ge H,et al. Slope structures and formation of rock-soil aggregate landslides in deeply incised valleys[J]. J Mt Sci,2020,17(2):316-328.
- [8] Gao Y C,Chen N S,Hu G S,et al. Magnitude-frequency relationship of debris flows in the Jiangjia Gully,China[J]. J Mt Sci, 2019,16(6):1289-1299.
- [9] Zhang T L,Zhou A G,Sun Q,et al. Hydrological response characteristics of landslides under typhoon-triggered rainstorm conditions[J]. China Geol,2020,3(3):455-461.
- [10] Cao P,Chen Z,Zhang S T,et al. Locking effect of granodiorite porphyry veins on the deformation of Baige landslide (eastern Tibetan plateau,Tibet)[J]. Arab J Geosci,2021,14(21):2224.
- [11] Xu W,Feng W K. Application of slope radar (S-SAR) in emergency monitoring of the “11.03” Baige Landslide[J]. Math Probl Eng,2021,2021:2060311.
- [12] Zhang Y F,Tie Y B,Wang L Q,et al. CT scanning of structural characteristics of glacial till in Moxi River Basin, Sichuan Province[J]. Appl Sci,2022,12(6):3040.

- [13] 张勇,刘宇,胡小龙,等.怒江高阶地的发现及其地质环境意义[J].科学技术与工程,2021,21(5):1713–1720.
Zhang Y,Liu Y,Hu X L,et al. The discovery of high terrace of the Nujiang River and its geological environment significance[J]. Sci Technol Eng,2021,21(5):1713–1720.
- [14] 杨秀元,付杰,韩旭东,等.三峡库区万州至巫山段城镇地质灾害调查进展[J].中国地质调查,2021,8(1):97–107.
Yang X Y,Fu J,Han X D,et al. Progress of geological hazards survey in the urban area from Wanzhou to Wushan in the Three Gorges Reservoir[J]. Geol Surv China,2021,8(1):97–107.
- [15] 张勇,胡小龙,刘宇,等.怒江上江镇一级阶地上覆粗颗粒土成因探讨[J].科学技术与工程,2020,20(36):14804–14808.
Zhang Y,Hu X L,Liu Y,et al. The cause of formation of coarse – grained soil on the first terrace of Nujiang River Shangjiang Town in Yunnan Province[J]. Sci Technol Eng,2020,20(36):14804–14808.
- [16] 王家柱,高延超,冉涛,等.川藏铁路交通廊道某大型古滑坡成因及失稳模式分析[J].现代地质,2021,35(1):18–25.
Wang J Z,Gao Y C,Ran T,et al. Analysis of genetic mechanism and failure mode of a large paleo – landslide in Sichuan – Tibet railway transportation corridor[J]. Geoscience,2021,35(1):18–25.
- [17] 熊小辉,白永健,铁永波.川西雅江地区构造 – 岩石变形特征及其控灾机制[J].现代地质,2021,35(1):145–152.
Xiong X H,Bai Y J,Tie Y B. Geological structure and rock deformation characteristics and their geohazard – controlling mechanism in Yajiang Area, West Sichuan[J]. Geoscience,2021,35(1):145–152.
- [18] 梁京涛,铁永波,赵聪,等.基于贴近摄影测量技术的高位崩塌早期识别技术方法研究[J].中国地质调查,2020,7(5):107–113.
Liang J T,Tie Y B,Zhao C,et al. Technology and method research on the early detection of high – level collapse based on the nap – of – the – object photography[J]. Geol Surv China,2020,7(5):107–113.
- [19] 王俊豪,管建军,魏云杰,等.德钦县城直溪河泥石流成灾模式及运动过程模拟[J].水文地质工程地质,2021,48(6):187–195.
Wang J H,Guan J J,Wei Y J,et al. A study of the disaster model and movement process simulation of debris flow in the Zhixi River of Deqin County[J]. Hydrogeol Eng Geol,2021,48(6):187–195.
- [20] 冉涛,周洪福,徐伟,等.川西交通廊道雅安 – 泸定段典型岩质边坡失稳模式、破坏机理及防治措施[J].自然灾害学报,2020,29(4):200–212.
Ran T,Zhou H F,Xu W,et al. Research on the instability modes, failure mechanisms, and preventive measures of representative rock slopes within Ya’an – Luding section of the western Sichuan transportation corridor[J]. J Nat Dis,2020,29(4):200–212.
- [21] 戴可人,铁永波,许强,等.高山峡谷区滑坡灾害隐患 InSAR 早期识别——以雅砻江中段为例[J].雷达学报,2020,9(3):554–568.
Dai K R,Tie Y B,Xu Q,et al. Early identification of potential landslide Geohazards in alpine – canyon terrain based on SAR interferometry: A case study of the middle section of Yalong river[J]. J Radars,2020,9(3):554–568.
- [22] 铁永波,徐如阁,刘洪,等.西昌市泸山地区典型火后泥石流特征与成因机制研究——以响水沟左岸 3#支沟为例[J].中国地质调查,2020,7(3):82–88.
Tie Y B,Xu R G,Liu H,et al. Study on the characteristics and formation mechanism of the typical post – fire debris flow in Lushan area of Xichang City: A case study of 3# branch on the left bank of Xiangshuigou[J]. Geol Surv China,2020,7(3):82–88.
- [23] 梁京涛,马志刚,赵聪,等.西南深切河谷区滑坡早期识别及斜坡微地貌动态演化特征研究——以北川县白什乡老街后山滑坡为例[J].灾害学,2020,35(2):122–126,135.
Liang J T,Ma Z G,Zhao C,et al. The research of early identification of landslide and dynamic evolution of slope microtopography in deep valley of Southwest China: A case study of the landslide in the Ancient Street of Baishi Township, Beichuan County[J]. J Catastrophol,2020,35(2):122–126,135.
- [24] 孙强,张泰丽,伍剑波,等.浙南花岗岩残积土物质结构及工程地质特性研究[J].地质论评,2020,66(s1):163–166.
Sun Q,Zhang T L,Wu J B,et al. Material structure and engineering geological characteristics of granite residual soil in southern Zhejiang Province[J]. Geol Rev,2020,66(s1):163–166.
- [25] 白永健,倪化勇,葛华.青藏高原东南缘活动断裂地质灾害效应研究现状[J].地质力学学报,2019,25(6):1116–1128.
Bai Y J,Ni H Y,Ge H. Advances in research on the geohazard effect of active faults on the southeastern margin of the Tibetan Plateau[J]. J Geomech,2019,25(6):1116–1128.
- [26] 铁永波,徐伟,梁京涛,等.川藏铁路卡子拉山滑坡发育特征与防灾减灾对策[J].水文地质工程地质,2021,48(5):129–136.
Tie Y B,Xu W,Liang J T,et al. Characteristics of Kazila mountain landslide and its mitigation measures on the Sichuan – Tibet Railway[J]. Hydrogeol Eng Geol,2021,48(5):129–136.
- [27] 杨顺,余涛,张勇,等.怒江云南段高山峡谷区泥石流堵河危险研究[J].地质论评,2021,67(s1):25–27.
Yang S,She T,Zhang Y,et al. The research on the hazard risk of blocking river in Nujiang great valley, Yunnan Province[J]. Geol Rev,2021,67(s1):25–27.
- [28] 赵聪,铁永波,梁京涛.基于机载 LiDAR 技术的泥石流物源侵蚀量定量评价研究[J/OL].沉积与特提斯地质,2021,doi:10.19826/j.cnki.1009–3850.2021.09004.
Zhao C,Tie Y B,Liang J T. Quantitative evaluation of debris flow provenance erosion based on Airborne LiDAR Technology[J/OL]. Sedimen Geol Tethyan Geol,2021,doi:10.19826/j.cnki.1009–3850.2021.09004.
- [29] 铁永波,阮崇飞,杨顺,等.云南省贡山县“5·25”暴雨诱发地质灾害的特征与形成机制[J].水土保持通报,2021,41(2):10–15,24.
Tie Y B,Ruan C F,Yang S,et al. Characteristics and mechanism of geological disasters induced by “5·25” rainstorm in Gongshan County of Yunnan Province[J]. Bull Soil Water Conserv,2021,

41(2):10-15,24.

[30] 铁永波, 蹇代君. 从巨震中归来九寨沟“疗伤”的背后[J]. 中国国家地理, 2021(7):86-99.

Tie Y B, Jian D J. Returning from the earthquake - behind Jiuzhaigou “healing” [J]. Chin Nat Geogr, 2021(7):86-99.

[31] 铁永波, 徐伟, 向炳霖, 等. 西南地区地质灾害风险“点面双控”体系构建与思考[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2022, 33(3):106-113.

Tie Y B, Xu W, Xiang B L, et al. The thoughts on construction of “double-control of point and zone” system of geological hazard risk in southwest China[J]. Chin J Geol Hazard Control, 2022, 33(3):106-113.

[32] 邹凤钗, 冷洋洋, 陶小郎, 等. 基于斜坡单元的滑坡风险识别——以贵州万山浅层土质斜坡为例[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2022, 33(3):114-122.

Zou F C, Leng Y Y, Tao X L, et al. Landslide hazard identification based on slope unit: A case study of shallow soil slope in Wanshan, Guizhou Province [J]. Chin J Geol Hazard Control, 2022, 33(3):114-122.

[33] 李光辉, 铁永波, 白永建, 等. 则木河断裂带(普格段)地质灾害发育规律及易发性评价[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2022, 33(3):123-133.

Li G H, Tie Y B, Bai Y J, et al. Distribution and susceptibility assessment of geological hazards in Zemuhe fault zone (Puge section) [J]. Chin J Geol Hazard Control, 2022, 33(3):123-133.

[34] 易靖松, 王峰, 程英建, 等. 高山峡谷区地质灾害危险性评价——以四川省阿坝县为例[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2022, 33(3):134-142.

Yi J S, Wang F, Cheng Y J, et al. Study on the risk assessment of geological disasters in alpine valley area: A case study in Aba County, Sichuan Province [J]. Chin J Geol Hazard Control, 2022, 33(3):134-142.

Genetic mechanism and risk assessment of typical geological hazards in mountainous and hilly areas of South China

TIE Yongbo¹, SUN Qiang², XU Yong³, ZHANG Yong⁴, WEI Yunjie⁵,
YANG Xiuyuan⁶, ZHANG Taili², TAN Jianmin³

(1. Chengdu Center of China Geological Survey, Sichuan Chengdu 610081, China; 2. Nanjing Center of China Geological Survey, Jiangsu Nanjing 210016, China; 3. Wuhan Center of China Geological Survey, Hubei Wuhan 430205, China; 4. Institute of Exploration Technology, China Academy of Geological Sciences, Sichuan Chengdu 611734, China; 5. China Institute of Geo-Environment Monitoring, Beijing 100081, China; 6. Hydrogeology and Environmental Center, China Academy of Geological Sciences, Hebei Baoding 071051, China)

Abstract: The mountainous and hilly area of South China has a large geographical span, with complex geological hazard pregnant background and diverse disaster modes, and it is an area with dense distribution of geological hazards in China. Aiming at the potential risk of geological hazards in mountainous and hilly areas of South China, the authors in this paper systematically analyze the climatic dynamic characteristics and geological structure background of geological hazard in mountainous and hilly areas of South China, based on progress of the implementation of “geological hazard investigation project in mountainous and hilly areas of South China” by China Geological Survey. The disaster models of typical geological hazards and the demonstration results of multi-scale risk investigation and evaluation are analyzed, and the formation mechanism and provenance erosion mechanism of typical typhoon geological hazards in southeast coastal areas, karst collapse in South China, moraine soil debris flow in southwest Alpine mountainous areas and post fire debris flow in Western Sichuan Plateau are revealed. On this basis, a multi-scale geological hazard risk assessment demonstration based on counties, key towns and typical disaster points in mountainous and hilly areas of South China was carried out, and the relevant results were applied in the planning and route selection of major projects in Southwestern China and the relocation site selection of counties.

Keywords: mountainous and hilly areas of South China; formation model of geological hazard; fine survey; risk assessment; application and demonstration

(责任编辑: 刁淑娟)